文章编号: 1672 - 3317 (2023) 09 - 0079 - 08

# 基于 CT 扫描的微塑料对砂壤土孔隙结构的影响研究

王志超,李嘉辰,张博文,敬双怡,李卫平\* (内蒙古科技大学 能源与环境学院/黄河流域内蒙古段生态保护与 综合利用自治区协同创新中心,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 【目的】探究微塑料对砂壤土孔隙结构的影响,为土壤新型污染物微塑料的防治提供科学依据,也对应用 CT 扫描进行土壤结构与土壤质量评估提供借鉴与指导。【方法】采用室内土柱模拟方法和计算机断层扫描技术, 对 CK(未赋存微塑料的空白组)和 M(赋存 2%浓度聚丙烯微塑料的试验组)处理进行了三维土壤孔隙结构的可 视化分析和孔隙特征参数的测定。【结果】聚丙烯微塑料显著影响砂壤土孔隙结构。通过对三维孔隙结构可视化研 究发现,CK 中土壤孔隙分布较为均匀,出现明显下沉且纵向连续性强,而 M 处理中土壤孔隙破碎化程度高,连通 性较差;且CK 中土壤乳隙度为 4.98%, M 处理中土壤乳隙度只有 3.79%。聚丙烯微塑料赋存条件下土壤乳隙数量 与乳隙体积分布随土壤深度发生变化。在土柱 0~4 cm 深度范围内,土壤乳隙总数量表现为 CK>M 处理, M 处理 中土壤乳隙总数较 CK 降低了 73.02%,且二者的乳隙数量差异随土壤深度的增加而逐渐增大;土壤平均乳隙体积 表现为 CK(1 709 mm<sup>3</sup>)>M 处理(1 235 mm<sup>3</sup>),且相较于 CK,M 处理的大体积土壤乳隙数量占比有不同程度 的降低。聚丙烯微塑料对砂壤土乳隙形态特征产生了影响。随着土层深度的增加,CK 的乳隙成圆率趋于平稳,乳 隙更接近圆形;但乳隙平均当量直径却表现为 M 处理>CK,M 处理的平均当量直径均随土壤深度的增加呈逐渐上 升的趋势。【结论】聚丙烯微塑料的赋存影响了砂壤土乳隙结构并降低了土壤乳隙度,对土壤乳隙数量和形态特征

关键词:计算机断层扫描技术;微塑料;土壤孔隙结构;三维可视化
 中图分类号: S152.7
 文献标志码: A
 doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022541



王志超, 李嘉辰, 张博文, 等. 基于 CT 扫描的微塑料对砂壤土孔隙结构的影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 79-86. WANG Zhichao, LI Jiachen, ZHANG Bowen, et al. Effect of Microplastics on Pore Structure of Sandy Loam Soil: Study Using X-ray Computed Tomography[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 79-86.

# 0 引 言

【研究意义】目前,微塑料污染已受到国内外 学者的广泛关注,但相关研究热点多集中于水体中 微塑料赋存及其生物毒理学等方面的研究<sup>[1-3]</sup>,但关 于土壤中微塑料的影响研究则相对较少。然而土壤 环境的健康稳定直接影响陆地生态系统的平衡与安 全<sup>[4-6]</sup>。【研究进展】全球有超过一半的污染物最终 滞留在土壤中,土壤是地球污染物最大的"汇"<sup>[7]</sup>。 据报道,在对瑞士 29 个洪泛平原的调查中发现,有 90%的土壤中存在微塑料污染,其污染水平与流域 的人口密度显著相关<sup>[8]</sup>;王志超等<sup>[9]</sup>对我国内蒙古河 套灌区的农田土壤进行研究发现,0~10、10~20 cm 和 20~30 cm 土层深度的微塑料丰度每千克土壤分别 高达 895.1~2 197.1、798.6~2 111.4 个和 756.0~1 971.8 个。微塑料作为土壤中的非可溶性固体颗粒,且因 其具有多孔等物理特性,极易吸附土壤中的其他有 机、无机污染物从而形成复合污染效应,同时微塑 料对土壤孔隙、团聚体等土壤结构的影响已被国内 外广大学者研究证实[10-11]。前期研究结果显示,土 壤结构与土壤孔隙的数量、大小及其分配情况有关, 影响着土壤与外界水分、养分、空气和热量的交换, 从而影响着土壤中物质与能量的迁移转化<sup>[12]</sup>。目前 大多数研究显示微塑料会降低土壤的孔隙率和通透 性[10,13-14],但也有少数研究表明微塑料会增加土壤 孔隙率[15]。究其原因,是目前关于土壤孔隙率的相 关研究主要是通过土壤含水率、土壤体积质量等计 算得出,缺少有关微塑料对土壤孔隙可视化、直接 定量化的研究。当前,随着计算机辅助断层扫描成 像(CT 断层扫描)技术的发展,CT 断层扫描技术 因其简单方便、图像清晰、不破坏原状土等特点越 来越广泛地应用于压实土壤、尾矿土壤等土壤孔隙 微观结构的研究中<sup>[16-18]</sup>。CT 断层扫描把需要扫描的 地方按要求切割成很多相等的层次,进而利用 Avizo 等专业 3D 建模和渲染软件三维可视化土壤孔 隙结构特性<sup>[19]</sup>;同时,三维数据建模为定量化评估

收稿时间:2022-09-30 修回日期:2023-05-10 网络出版日期:2023-05-12 基金项目:国家自然科学基金项目(42007119);内蒙古自治区高等学 校青年科技英才支持计划项目(NJYT22066);内蒙古自治区直属高校 基本科研业务费项目(2022038)

作者简介: 王志超(1988-),男。副教授,博士,主要从事水土环境治理与修复研究。E-mail:wzc5658@126.com

通信作者: 李卫平(1973-),男。教授,博士,主要从事北方寒旱区湖 泊水生态治理与修复研究。E-mail: sjlwp@163.com

<sup>◎《</sup>灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

土壤孔隙结构变化提供了有效办法,通过引入数学 模型计算孔隙形态,可直接有效测量土壤孔隙的尺 寸、形状、表面积和连通性等<sup>[20]</sup>。【切入点】土壤 俨然已成为微塑料的巨大环境储存库。然而,土壤 中微塑料污染问题并不像空气和水污染那样直观、 容易被察觉并受到广泛的关注与重视。因此,开展 微塑料这一新兴污染物对土壤环境的影响研究迫在 眉睫。【拟解决的关键问题】本文通过开展室内模 拟试验, 以 0~5 cm 深度赋存微塑料的砂壤土为主要 研究对象,结合 CT 断层扫描技术和 Avizo 三维重构 软件,定量化、可视化分析不同处理的土壤孔隙结 构,对比不同处理下的土壤孔隙二维和三维特征参 数的差异性,阐明微塑料对砂壤土结构的影响。以 期为微塑料对土壤水力特性的影响机理研究提供理 论基础,为农业生产、合理制定灌溉制度和土壤新 型污染物微塑料的防治提供科学依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 供试材料

备试土壤采集于内蒙古河套灌区,为了减少土 壤中微塑料的本底值,选择未经耕作、人工干扰较 小的土壤样品,采集深度为地面以下 50~150 cm, 去除大粒径杂质后带回实验室,将土样进行风干, 在此过程中需不断进行翻拌,使土壤完全风干,之 后对土壤样品砸碎研磨,在碾碎过程中为避免对后 续实验产生污染,故选用玛瑙材质的研钵进行捣碎 研磨,最后将研磨后的土壤样品过 2 mm 筛,确保 土质均质。

利用纳米激光粒度仪 (NANOPHOXTM, Symaptec 公司,德国)对土壤样品进行颗粒分析, 其中黏粒(粒径小于 0.002 mm)占比 1.32%, 粉粒 (0.01~0.50 mm) 占比 18.60%, 砂粒 (0.50~1.0 mm) 占比 80.08%, 土质属于砂壤土。本试验所使用聚丙 烯微塑料为广东特塑朗化工有限公司制造, 微塑料 粒径为 150 μm, 形状为球状, 密度为 0.90 g/cm<sup>3</sup>, 熔点 176 ℃。根据戚瑞敏等<sup>[21]</sup>对中国典型覆膜农区 微塑料粒径分级统计的研究结果,不同种植条件下 农田土壤中(50~100 µm)和(100~250 µm)2种小 粒径等级的微塑料量占较大比例,故本试验选用 150 µm 的微塑料进行研究具有广泛代表性。另外, 由于本课题组前期在微塑料对土壤水分入渗和蒸发 影响的试验中,发现2%丰度聚丙烯微塑料对土壤水 分运移影响最为显著<sup>[9]</sup>,因此本试验采用 2%丰度聚 丙烯微塑料进行模拟。

供试土柱制备选用直径 5 cm,高度 5 cm的金属 环刀进行制样。首先将样品土样均匀填装在环刀中, 为消除优势流对于 CT 扫描结果的影响,在环刀内壁 均匀涂抹凡士林,每 3 cm 进行打毛并压实,土壤体 积质量 1.5 g/cm<sup>3</sup>。另制备土壤与 2%丰度聚丙烯微塑 料均匀混合,并按原土柱中的体积质量进行填装。 各土柱填装完成后,在容器中过水浸泡 24 h,使土 柱中水分饱和,之后将其放到干燥砂盘吸水并静置 12 h,随后放入烘箱烘干,烘干时间 48 h。其中无 微塑料赋存的空白处理编号为 CK,赋存 2%丰度聚 丙烯微塑料的处理编号为 M,每组各设置 3 个平行 处理。最后放进装有泡沫箱的纸箱里送检。

### 1.2 CT 断层扫描

CT 断层扫描是一种非侵入性和非破坏性的成像 技术,它在不损坏样品的情况下使用 X 射线扫描物 体获得样品内部三维结构和形貌信息<sup>[22]</sup>。本次 CT 扫描所用仪器为 skysCan2211 320kV,将供试土柱放 进 CT 扫描仪,从顶端每隔 0.1 mm 扫描一个横截面, 5 cm 高的土柱共扫描得 500 幅横截面图;间距 1 度 进行拍摄纵截面图,共 360 张纵截面图,CT 扫描的 峰值电压为 320 kV。扫描土柱的每个横截面的 CT 图片(图 1)中密度越小,显示的颜色就越深,所 以图像中的灰黑色小圆点就是土壤中的孔隙。



图1 CT 原始图像

Fig.1 CT scanning original image

CT 断层扫描装置主要由 X 射线产生装置、X 射 线检测器、图像处理器和图像显示装置组成。CT 断 层扫描仪器首先发射 X 射线束,当 X 射线束穿透土 壤柱时,由于土壤中物质的密度不均匀,导致 X 射 线产生能量变化;当 X 射线到达检测器并以不同的 射线能量被探测到时,就会形成一个投影信号,从 而产生一组投影数据;当 X 射线穿过由不同物体组 成的密度为 D 的一组物体时,衰减程度是由物质在 光通路中每个离散点的衰减系数决定的:

$$I = I_0 \mathbf{e} \left[ -\int \mathbf{w}(x) \, \mathrm{d}x \right], \tag{1}$$

式中: I为射线的衰减强度;  $I_0$ 为 X 射线的初始强度; w为该物体的线性衰减系数。

因此, CT 将 X 射线束在多个方向扫描一定厚度 的物体,得到其内部各点的衰减系数,再用转换器 将其转换成电子信号,之后转变为数字,根据原始 矩阵序列转化形成 CT 图像。

#### 1.3 图像处理与土壤孔隙结构特征参数测定

将得到的土柱截面 CT 扫面图像, 基于 29.4 µm 扫描分辨率,所有成像和计算过程均基于该分辨率 开展,对样品进行孔隙率、孔隙体积、孔隙表面积 分析和三维视图内部展示,并输出 tiff 格式图像。采 用 Avizo 软件确定孔隙立体结构图, 紧实土壤颗粒 呈白色,土壤孔隙呈深色。研究利用 Avizo 2020 软 件对 CT 图像进行分析处理, Avizo 软件可以进行图 像重建并获取孔隙结构的特征参数如孔隙度、孔隙 数量、平均孔隙体积、成圆率,定量研究微塑料赋 存条件下土壤孔隙结构特征。

土壤孔隙结构特征参数测定:

1) 孔隙度、孔隙数、孔隙面积、孔隙周长和孔 隙体积

孔隙度、孔隙数、孔隙面积和孔隙周长均可以 通过 Avizo 软件二值化后的图像进行处理获得,孔 隙体积通过三维可视化后得出。

2) 当量直径(Equival Apaerture)

当量直径指面积与不规则物体面积相同的圆形 的直径,其计算式为:

$$ED = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}, \qquad (2)$$

式中: ED 为当量直径(µm); A 为孔隙实测面积  $(\mu m^2)$  。

3) 成圆率(Roundness)

成圆率通常用来描述物体横截面接近圆的程度, 在 0~1 范围内,其数值越接近于 1,表示孔隙横截面 越接近于理论圆,孔隙形态越规则。其计算式为:

式中: R为成圆率; L为孔隙实测周长(µm)。

# 1.4 数据处理

为避免土样的边缘地区出现偶然情况,影响试 验结果的准确性,最终选择 400 个切片进行分析 (每100个切片代表1 cm),图像均在 Avizo 2020 软件中生成,通过 Excel 导入并分析数据;图形绘制 在 Origin 2018 软件中完成。

 $R=4\pi A/L^2$ ,

#### 2 结果与分析

# 2.1 聚丙烯微塑料对砂壤土孔隙结构的影响

赋存聚丙烯微塑料对 0~3 cm 深度的砂壤土孔隙 二维结构的影响见图 2。选择 3 个研究对象的切片图 并挑选中心位置观察各土样的二维孔隙结构特征。 由图 2 可知(图中蓝色代表土壤孔隙,灰度部分代 表土壤基质),与 CK 相比,赋存聚丙烯微塑料的 M处理分别在不同程度上降低了在1、2 cm 和 3 cm 处土壤深度下的土壤孔隙数量和孔隙大小。二维灰 度图像表明, M 处理比 CK 土壤内部结构更为致密, 而孔隙相对较少,在不同土层中含有独立的小孔隙, 孔隙间的连通性不强,只有在某些区域有细长孔隙。 而 CK 的土体内部孔隙分布相对较广, 数量较多, 土壤结构较为疏松,在不同土层中含有大量细小孔 隙的同时也存在明显的细长孔隙,呈横向连通状, 且孔隙形状大小均匀、规律,这说明聚丙烯微塑料 的赋存不仅能在一定程度上减少土壤孔隙数量,也 能改变土壤孔隙分布。



(d) M-1 cm

(e) M-2 cm



(3)

选取土柱中心的1000×1000×300部分的方形区 域进行三维重建,以便更直观地展现聚丙烯微塑料 赋存对土壤孔隙的形态、连通性和分布特征的影响。 不同处理中砂壤土三维结构可视化图像见图 3 (图 中有色部分代表不同粒径大小的土壤孔隙)。从三 维孔隙结构图中可以看出, CK 与 M 处理砂壤土孔 隙形态特征清晰且存在明显的差异性。其中 CK 中 土壤小型孤立孔隙分布较为均匀,孔隙连通度较高, 图中的绿色部分可以十分清晰地看出 CK 的土壤具 有优良的纵向连通性,其中,在一些边角区域,绿 色的孔隙也可直观地体现出 CK 土壤的横向连通性, 土壤孔隙结构相对复杂;而赋存聚丙烯微塑料的 M 处理中土壤孔隙破碎化程度明显高于 CK, 许多细小 孤立孔隙呈粉末状, 而土壤的狭长连通孔几乎看不 见,多数较大的孔隙呈薄片状,故三维可视化图像 表明土壤整体孔隙体积、孔隙个数相较于 CK 要小 很多。通过对 CT 图像的定量分析可计算得到不同处 理的土壤孔隙度,其中未加微塑料 CK 中土壤孔隙 度为 4.98%, 而在赋存聚丙烯微塑料的 M 处理中土 壤孔隙度只有 3.79%, 呈显著性差异。由此可以看 出定量分析结果同定性观察趋势一致,说明聚丙烯 微塑料的赋存显著降低了砂壤土的孔隙度。

# 2.2 聚丙烯微塑料对土壤孔隙数量与孔隙体积分布的 影响

将不同处理下每个重复的孔隙数量沿土壤深度 的变化绘制在坐标系内,如图 4 所示。在土柱 0~4 cm 深度范围内, 2 个处理在三维尺度下的土壤孔隙 数量均随土壤深度的增加而增多,土壤整体孔隙总 数量表现为 CK>M 处理,其中孔隙量以体素计 (在 Avizo2020 中, 描述孔隙数量和体积的方法可 以引入 Voxel (体素) 的概念, 类似于照片中的像素。 体素个数的多少,可以间接反映出土样中孔隙量的

多少,体素值越大,说明孔隙占据的空间越多,孔 隙的总体积就越大。在本试验中,1体素代表着分 辨率值: 29.4 um 的立方, 故体素的多少可以反映土 样的整体孔隙占据空间的多少<sup>[23]</sup>。): CK 中土壤孔 隙总体素为 15 013 167 个, M 处理中土壤孔隙总体 素为 11 437 641 个; 以 Label Analysis 模块中的 Index 计(真实孔隙个数):分别是 141 398 个和 38 149 个, M 处理中土壤孔隙总数较 CK 降低了 73.02%。 另外,CK 中孔隙数量随土壤深度增加几乎呈线性增 加的趋势( $R^2 > 0.99$ ),而 M 处理中则表现出幂函数 增长的趋势,随着土壤深度的增加,2个处理的孔隙 数量差异逐渐增大,其中在第 1、2、3、4 cm 处, M 处理中土壤孔隙数量较 CK 分别降低了 62.82%、 62.24%, 66.40%, 73.02%.







图4 CK和M处理中土壤总孔隙数量随土壤深度的变化 Fig.4 Variation of total soil pore number with soil depth in CK and M treatments

在表述土壤孔隙尺寸时,单个孔隙体积大小也常 被用于描述孔隙尺寸,该参数综合了孔隙的长度和直 径的变化,因此,经常被用于描述土壤孔隙的空间尺

寸变化[24]。相较于当量直径,土壤孔隙的体积与孔 隙过水能力、气体交换以及化学物质沿孔隙的运移有 更直接的联系。因此,计算不同体积尺寸大小的孔隙

160

140

120

100 累计个数/

80

60

40

20

0

 $10^{3}$ 

隙

分布特征可以更加全面地描述不同处理对土壤孔隙空 间尺寸变化的影响。选取土柱中心 1 000×1 000×400 的方形区域作为研究对象,结果图 5 所示。M 处理 土样的孔隙总体积明显的下降,未添加微塑料处理 的土壤孔隙的总体积为 1 709 mm<sup>3</sup>, 而添加微塑料 的 M 处理土壤孔隙体积下降为 1 235 mm<sup>3</sup>;同时孔 隙大小的分布结构,也出现了明显的变化,CK 的 总孔隙有 58 988 个, M 处理的总孔隙有 25 851 个。 由于本试验土样体积大于 0.01 mm<sup>3</sup> 的孔隙体积占体 积总量的主导地位, 故以 0.01 mm<sup>3</sup> 作为分割大小孔 隙的水准。对于体积大于 0.01 mm<sup>3</sup>的较大孔隙部分, 由 CK 的 6 925 个下降至 M 处理的 6 721 个,体积 由 1 595 mm<sup>3</sup>下降至 1 177 mm<sup>3</sup>,但较大孔隙个数占 全部孔隙个数的比重却出现了相反的情况,由 CK 的 11.62%, 提升至 M 处理的 25.39%, 从图 5 可看 出,孔隙体积范围逐渐变大的时候,对照组和试验



组二者的孔隙数量已经相当。2个处理中不同体积土 壤孔隙数量百分比存在不同程度差异的原因可能与 微塑料的赋存破坏土壤中连通的孔隙结构有关[25], 粒径较小的微塑料在下渗过程中进入土壤孔隙,由 于其自身的疏水性,会直接堵塞原来的土壤孔隙。 王志超等[26]研究发现土壤中赋存微塑料明显降低了 土壤的过水能力,使水分下渗速率变慢,并且这一 现象与微塑料的疏水性及对土壤孔隙的堵塞有关。 这些也表明未添加微塑料的土壤很有可能由少量但 单个体积较大的孔隙所充斥,并且由三维图可知, 未添加微塑料的土样存在的大孔隙多为连通孔隙, 其他小孔隙为孤立孔隙,通过这些现象可以大致猜 测,很有可能微塑料会优先堵塞最小的孔隙,并将 较大的孔隙适当分割成薄片状,从而出现大孔隙的 体积稍微变小,但中小型孔隙的数量占比反而增多 的现象。







#### 2.3 聚丙烯微塑料对土壤孔隙形态特征的影响

应用CT扫描技术可以定量描述土壤中当量直径 和成圆率等孔隙形态特征[27],不同处理土壤中孔隙 的成圆率随土壤深度的变化如图 6(a)、图 6(b) 所示。孔隙成圆率是表征孔隙形态特征的参数之一, 孔隙成圆率以 Label Analysis 模块中的 Shape VA3d 计,其数值越接近于1,表示孔隙形态越接近于圆, 一般认为数值处于 0.8~1.1 之间,即可表示为圆形孔 隙<sup>[28]</sup>。大量研究认为成圆率可以判断土壤孔隙的大 小,孔隙越趋于规则,越利于水分在土壤中的运输、 保存及作物吸收和利用<sup>[29]</sup>。在 0~4 cm 土壤深度范围 内, CK 的 Shape VA3d 平均值在 1.20~1.31 之间, M 处理的 Shape VA3d 平均值在 1.32~1.63 之间,从 图 6(a) 可以看出, M 处理的成圆率波动范围更大, CK 的平均成圆率更接近 1, 不仅如此, Shape VA3d 值在 0.8~1.1 范围内的孔隙在 CK 土壤 中的数量和占比均多于 M 处理, 且随着土层深度的 增加,CK 的孔隙成圆率趋于平稳,但 M 处理的孔

隙成圆率忽高忽低,这表明相较于赋存微塑料的 M 处理,CK 中的土壤孔隙形态更接近于圆形,土壤中 以形状规则的大孔隙居多,土壤的孔隙圆度更稳定, 这也与 2.1 的三维结构图像和 2.2 中结果相符。微塑 料的赋存可能在一定程度上破坏了原有的土壤孔隙 结构进而形成了更小的孔隙,使孔隙形态变得破碎 且不完整,故 CK 相较 M 处理更容易形成接近圆形 的孔隙。

比较 2 种不同处理下的土壤大孔隙当量直径随 土壤深度的变化(图 6 (c))可知,CK 中孔隙平 均当量直径略微小于 M 处理。在 0~4 cm 土壤深度 范围内,CK 中土壤孔隙当量直径平均值在 163.8~174.4 μm 之间,M 处理孔隙当量直径在 212.4~224.1 μm之间,随着土壤深度的增加,CK 的 孔隙当量直径呈缓慢上升趋势,M 处理的孔隙当量 直径趋于平稳,但仍大于 CK,这与 2.2 中大型孔隙 数量规律类似。



Fig.6 Pore morphology characteristics of soil layers at different soil depths for CK and M treatments

的土壤微观结构仍有待深入研究。

# 3 讨论

CT 断层扫描技术精准获取微塑料赋存条件下土 壤结构孔隙的几何信息,可以更科学、有效地认识 微塑料对土壤结构的影响,王伟鹏等<sup>[30]</sup>依托定位施 肥试验,集成同步辐射显微 CT 与图像处理技术,定 量分析了不同施肥措施对褐土微观结构及稳定性的 影响。邱琛等<sup>[31]</sup>利用 CT 扫描技术研究了有机物料 还田深度对黑土孔隙结构影响。本文利用 CT 断层扫 描,有效地展现出了聚丙烯微塑料赋存下的砂壤土 孔隙率、孔隙结构等变化,阐释了微塑料添加对土 壤孔隙产生的不利影响,做到图像可视化和数据分 析的有机结合。

CT 断层扫描的三维数据建模为定量化评估土壤 孔隙结构变化提供了有效办法,通过引入数学模型 计算孔隙形态,可直接有效测量土壤孔隙的尺寸、 形状、孔隙成圆率、当量直径和连通性等。本研究 发现,聚丙烯微塑料显著影响了砂壤土孔隙结构, 使土壤孔隙破碎化程度变高, 孔隙分布更为混乱, 破坏了原有土壤的大型连通孔隙,形成薄片状,且 土壤孔隙度只有 3.79%。聚丙烯微塑料赋存条件下 土壤孔隙数量有不同程度的降低,土壤孔隙成圆率 总体下降,圆形孔隙的占比也有降低,虽然当量直 径的最大值低于原始土壤,但当量直径平均值略有 增加,添加微塑料的土壤孔隙当量直径随土壤深度 总体呈上升趋势。牛文全等[32]研究结果证实了残膜 降低了土壤孔隙度和通透性,阻断了土壤孔隙的连 续性,进而改变土壤水动力学性能,导致土壤水分 入渗能力下降。Wang 等<sup>[33]</sup>利用 CT 扫描结合土壤孔 隙三维重建获得土壤孔隙结构特征, 定量分析微塑 料特性与土壤结构和土壤水分特征曲线之间的关系, 发现向砂土中添加更高浓度的大型聚乙烯微塑料会 降低土壤的孔隙度和成圆率,并且孔隙分布更加分 散,孔隙破碎度增加,和本研究得出的 CT 扫描结果 相似,但鉴于本研究的分辨率有限,添加微塑料后

# 4 结 论

 1)聚丙烯微塑料赋存影响了砂壤土孔隙结构, 使得土壤内部结构更为致密且孔隙破碎化程度增加, 连通孔隙减少,降低了土壤的孔隙率。

2)聚丙烯微塑料赋存条件下土壤孔隙数量与孔隙体积分布随土壤深度发生了变化,孔隙数量随土壤深度的增加呈现幂函数增长趋势,土壤的孔隙总体积明显降低。

3)聚丙烯微塑料对土壤孔隙形态特征产生了影响,孔隙成圆率在不同深度处均有下降,虽然当量 直径的最大值低于原始土壤,但平均当量直径却略高,当量直径随土壤深度总体呈上升趋势。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献:

- GALLOWAY T S, COLE M, LEWIS C. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem[J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(5): 116.
- [2] COLE M, LINDEQUE P, HALSBAND C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(12): 2 588-2 597.
- [3] IVAR DO SUL J A, COSTA M F. The present and future of microplastic pollution in the marine environment[J]. Environmental Pollution, 2014, 185: 352-364.
- [4] BOUCHER J, FRIOT D. Primary microplastics in the oceans: A global evaluation of sources[M]. Gland, Switzerland: IUCN International Union for Conservation of Nature, 2017.
- [5] HORTON A A, WALTON A, SPURGEON D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 127-141.
- [6] 张飞祥.聚酯微纤维对土壤物理性质的影响[D]. 昆明: 云南大学, 2019.

ZHANG Feixiang. Effect of polyester microfibers on soil physical properties[D]. Kunming: Yunnan University, 2019.

 [7] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2010.
 HUANG Changyong, XU Jianming. Agrology[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010.

- [8] SCHEURER M, BIGALKE M. Microplastics in Swiss floodplain soils[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(6): 3 591-3 598.
- [9] 王志超, 孟青, 于玲红, 等. 内蒙古河套灌区农田土壤中微塑料的赋存 特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 204-209.
   WANG Zhichao, MENG Qing, YU Linghong, et al. Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(3): 204-209.
- [10] ZHANG G S, ZHANG F X, LI X T. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 670: 1-7.
- [11] ZHANG G S, LIU Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in Southwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 12-20.
- [12] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社,
   2006.
   SHAO Ming'an, WANG Quanjiu, HUANG Mingbin. Soil physics[M].

Beijing: Higher Education Press, 2006.

- [13] 侯军华,檀文炳,余红,等. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研究进展[J]. 环境工程, 2020, 38(2): 16-27, 15.
  HOU Junhua, TAN Wenbing, YU Hong, et al. Microplastics in soil ecosystem: A review on sources, fate and ecological impact[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(2): 16-27, 15.
- [14] WANG F, WONG C S, CHEN D, et al. Interaction of toxic chemicals with microplastics: A critical review[J]. Water Research, 2018, 139: 208-219.
- [15] 任欣伟,唐景春,于宸,等. 土壤微塑料污染及生态效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1 045-1 058.
  REN Xinwei, TANG Jingchun, YU Chen, et al. Advances in research on the ecological effects of microplastic pollution on soil ecosystems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(6): 1 045-1 058.
- [16] 冯宇. 大型露天煤矿区排土场机械压实对土壤大孔隙结构及水力特性的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
   FENG Yu. Effects of large machinery compaction on soil macropore structure and hydraulic characteristics of dumping site in an opencast coal mine area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [17] FENG Y, WANG J M, LIU T, et al. Using computed tomography images to characterize the effects of soil compaction resulting from large machinery on three-dimensional pore characteristics in an opencast coal mine dump[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1 467-1 478.
- [18] 程亚南, 刘建立, 吕菲, 等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构三维重建及 水力学性质预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 115-122.
  Cheng Ya'nan, LIU Jianli, LYU Fei, et al. Three-dimensional reconstruction of soil pore structure and prediction of soil hydraulic properties based on CT images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 115-122.
- [19] CNUDDE V, BOONE M N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 123: 1-17.
- [20] WANG J M, QIN Q, BAI Z K. Characterizing the effects of opencast coal-mining and land reclamation on soil macropore distribution characteristics using 3D CT scanning[J]. Catena, 2018, 171: 212-221.
- [21] 威瑞敏. 中国典型覆膜农区土壤微塑料特征及生态效应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
   QI Ruimin. Characteristics and ecological effects of soil microplastic in typical agricultural region with plastic film mulching in China[D].

Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.

[22] 赵冬,许明祥,刘国彬,等.用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤

团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 123-129. ZHAO Dong, XU Mingxiang, LIU Guobin, et al. Characterization of soil aggregate microstructure under different revegetation types using micro-computed tomography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 123-129.

- [23] 许智隼, 胡五龙. 基于三维 X-CT 图像的结皮土壤孔隙结构特征与渗透率[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 89-97.
  XU Zhisun, HU Wulong. Characteristics of pore structure and permeability in soil crust using 3D X-CT images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 89-97.
- [24] LUO L F, LIN H, LI S C. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2): 53-64.
- [25] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构 的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 101-106, 140.
  WANG Zhichao, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 101-106, 140.
- [26] 王志超,张博文,倪嘉轩,等. 微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4 394-4 401.
   WANG Zhichao, ZHANG Bowen, NI Jiaxuan, et al. Effect of microplastics on soil water infiltration and evaporation[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4 394-4 401.
- [27] GUO Y F, FAN R Q, ZHANG X P, et al. Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134 617.
- [28] 蔡太义,张佳宝,张丛志,等. 基于显微 CT 研究施肥方式对砂姜黑土 大孔隙结构的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(12): 143-149. CAI Taiyi, ZHANG Jiabao, ZHANG Congzhi, et al. Effects of fertilization mode on macropore characteristics of the Shajiang black soil (vertisol) based on computed tomography (CT) images[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(12): 143-149.
- [29] JARVIS N J. A review of non equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. European Journal of Soil Science, 2020, 71(3): 279-302.
- [30] 王伟鹏,张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的 影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 68-74.
  WANG Weipeng, ZHANG Hua. Effects of long-term fertilization on the microstructure and stability of cinnamon soil aggregates in cropland of North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10): 68-74.
- [31] 邱琛, 韩晓增, 陈旭, 等. CT 扫描技术研究有机物料还田深度对黑土 孔隙结构影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(14): 98-107. QIU Chen, HAN Xiaozeng, CHEN Xu, et al. Effects of organic amendment depths on black soil pore structure using CT scanning technology[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(14): 98-107.
- [32] 牛文全, 邹小阳, 刘晶晶, 等. 残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 110-119. NIU Wenquan, ZOU Xiaoyang, LIU Jingjing, et al. Effects of residual plastic film mixed in soil on water infiltration, evaporation and its uncertainty analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 110-119.
- [33] WANG Z C, LI W L, LI W P, et al. Effects of microplastics on the water characteristic curve of soils with different textures[J]. Chemosphere, 2023, 317: 137 762

# Effect of Microplastics on Pore Structure of Sandy Loam Soil: Study Using X-ray Computed Tomography

 WANG Zhichao, LI Jiachen, ZHANG Bowen, JING Shuangyi, LI Weiping\*
 (College of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology/ Autonomous Region Collaborative Innovation Center for Ecological Protection and
 Comprehensive Utilization of Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin, Baotou 014010, China)

Abstract: [Background] Microplastic particles are an emerging pollutant found in almost all ecosystems including soils. Its impact on soil function is multifactual, and this paper investigates the change in pore structure of soil contaminated by microplastic particles. [Method] Sandy loam soil samples with (treatment) and without (CK) contaminated by 2% of polypropylene microplastics were taken from different depths in soil columns. They were then scanned using x-ray Computed tomography. The pore structure in each sample was analyzed. [Result] The polypropylene microplastics significantly affected pore structure of the soil. 3D visualization revealed that the pores in the non-contaminated soil were more uniformly distributed and well connected compared to the contaminated soil. In contrast, pores in the contaminated soil were highly fragmented and less connected. The porosity of pores identified by the image was 4.98% and 3.79% for the CK and the treatment, respectively. The number of pores and distribution of pore volume varied with soil depths in soil column contaminated by microplastic particles. In the 0~4 cm soil layer, the total number of pores in the treatment was 73.02% lower than that in the CK. The difference in the number of pores between CK and the treatment increased gradually with the increase in soil depth. The average volume of pores in the CK and treatment was 1 709 mm<sup>3</sup> and 1 235 mm<sup>3</sup>, respectively, with CK containing more large pores than the treatment. The microplastics also influenced the pore morphology in that with the increase in soil depth, the pore rounding rate in the CK tended to stabilize and the pores were close to round. The average equivalent diameter of the pores in the treatment was greater than that in the CK, and increased gradually with the increase in soil depth. [Conclusion] Polypropylene microplastics not only reduced the porosity of the sandy loam soil, it also affected the number and morphology of the pores at different soil depths.

Key words: computed tomography technique; microplastics; soil pore structure; three-dimensional visualization

责任编辑:赵宇龙